干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

新疆区域高空气温变化特征分析

张连成[1]， 张太西[1]， 毛炜峄[2]， 司嘉怡[3]， 张同文[2]， 王胜利[1]
（1. 新疆维吾尔自治区气候中心，新疆 乌鲁木齐 830002；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 新疆工程学院，新疆 乌鲁木齐 830023）

摘 要：运用再分析资料（NCEP/NCAR）分析了新疆区域高空年均气温变化特征，同时运用逐步回归法对新疆高空冷月（1月）、暖月（7月）实测气温数据进行缺测插补，并通过交叉验证法对插补数据进行精度检验，在此基础上分析了新疆区域冷月、暖月高空气温变化特征，运用插补重建后的高空实测数据对1月、7月再分析资料（NCEP/NCAR）进行精度验证。结果表明：（1）新疆区域高空缺测插补后的数据精度较高效果较好，能够反映新疆高空气温变化的客观事实。（2）通过对新疆区域对流层（低、中、上）、平流层下层的冷、暖月和年平均变化趋势分析来看，随着高度的上升气温变化趋势由升温转为降温，并且随着高度的上升升温率在减小，减温率在增大；气温越高的月份，随着高度的升高，气温变化趋势发生改变的高度就越高；2000年后，对流层各层多为偏暖年，平流层下层多为偏冷年。（3）850 hPa和700 hPa年均温转折点均发生在1996年，由冷转暖；100 hPa发生在1995—1997年，由暖转冷；500 hPa和300 hPa均未出现明显的突变年份。（4）1月、7月再分析资料（NCEP/NCAR）与实测数据相关系数大多在0.9以上，总体误差相对较小。

关键词：高空气温；气候变化；新疆区域

高空大气是气候系统的重要组成部分，确定高空气象要素的变化是气候变化研究不可或缺的基础[1-4]。在全球地面增暖现象得到证实以后，随着研究的深入，对高空气候的研究也越来越受到关注，尤其是对高空气温变化的研究[5-8]。Free等[9-10]利用全球1958—1989年800多个探空站资料，发现平流层气温呈下降趋势；薛德强等[3]利用中国28个探空站地面至高空10 hPa的温度资料研究得出，地面至700 hPa温度上升，对流层上层至50 hPa的平流层温度降低，尤其是50 hPa降温最为显著；陈芳等[11]利用青海省7个探空站500 hPa高空观测资料揭示了该层在20世纪80年代中期发生了由冷向暖的突变，1987年后温度正异常增加，负异常减少；张金峰[5]对哈尔滨市高空温度研究得出，随着高度的升高气温并不是呈均匀线性分布。

对于新疆而言，地处欧亚大陆中心，远离海洋，能够较好的代表内陆高空气候变化的背景[12-13]，揭示高空气候变化事实，进而加深对新疆区域气候变化的整体认识。张广兴等[14]运用探空站资料，对新疆高空温度变化特征进行分析，得出对流层温度经历先降后升变化，曲线呈“V”形，对流层顶的200 hPa、250 hPa两个层次温度变化平稳。柏玲等[15]运用1980—2013年新疆地区8个探空站观测资料，得出30多年来新疆对流层上层至平流层中下层表现为降温趋势，对流层中下层呈升温趋势，对流层上层和平流层中下层降温幅度大于对流层中下层的增温幅度。侯玲红等[16]选用喀什单站探空资料，对喀什1971—2010年高空温度变化进行了分析，得出喀什高空温度850~300 hPa的季节变化趋势为单峰型，200 hPa上呈双峰型，100 hPa呈单峰型，但其位相与850~300 hPa的季节变化基本相反。上述研究可以看出，首先，对新疆区域高空气温变化的研究，在时间尺度上还不够完整，随着全球气候变暖[17-20]，新疆区域高空不同等压面在长时间尺度上（1961—

收稿日期：2020-08-25； **修订日期：**2020-10-29
基金项目：国家自然科学基金（41975095）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0102）；国家自然科学基金（42071075）；中国气象局气候变化专项（CCSF202015）资助
作者简介：张连成（1990-），男，工程师，主要从事区域气候变化研究. E-mail: 524480929@qq.com
通讯作者：张太西. E-mail: 1546219074@qq.com

2017年)气温如何变化却不得而知。其次,部分学者在研究的过程中选取的站点较少,分布的不够均匀,站点的缺少以及空间分布的不均匀,不能很好代表新疆整个区域高空气温变化事实。另外,新疆区域探空站数据缺测较多,以上学者对此问题均未给予阐述。

由于新疆区域探空站缺测数据较多,通过现有的测站数据分析新疆区域高空气温多年来的年际变化特征受到限制,然而再分析资料(NCEP/NCAR)具有较高的时空分辨率,可以弥补新疆区域高空站点数据缺测的不足。支星等[21]对三种再分析资料(NCEP/NCAR、ERA和JRA)的高空温度数据的可信度进行了分析,得出NCEP/NCAR资料能较好地表现高空温度的年代际变化特征;周顺武等[22]对青藏高原NCEP/NCAR高空温度数据与观测资料比较分析,得出在年际变化中NCEP/NCAR再分析资料的温度数据具有较高的可信度。

针对以上分析,本文选取1961—2017年再分析资料(NCEP/NCAR)分析新疆区域高空气温年际变化特征;选取新疆区域14个探空站高空气温数据,运用逐步回归法对冷月(1月,下同)、暖月(7月,下同)缺测数据进行插补重建,在此基础上分析高空气温冷月、暖月变化特征。

1 资料与方法

1.1 资料

1.1.1 探空资料 从新疆维吾尔自治区气象信息中心获取新疆区域14个探空站1961—2017年5个等压面(850 hPa、700 hPa、500 hPa、300 hPa、100 hPa)两时次(北京时间08:00和20:00)逐日高空气温资料。经统计得出:塔城、克拉玛依、北塔山等6站在20世纪60—80年代20:00数据不完整(表1),仅08:00有数据,为了保持资料时间序列的一致性,选取逐日08:00资料作为当日不同等压面的气温数据进行分析;08:00克拉玛依、阿克苏和民丰在20世纪60—90年代观测数据不完整(表1),在分析新疆区域时,700 hPa、500 hPa和300 hPa选取1961—2017年剩余11站的资料建立新疆区域气温平均序列;850 hPa在新疆海拔高度在1400~1500 m,北塔山站海拔高度超过1500 m,在建立850 hPa新疆区域气温平均序列时剔除北塔山站;100 hPa各个探空站在1980年之前资料缺测较为严重,时间序列选择1980—2017年,另外,克拉玛依站100 hPa在1980年后资料较为完整,在建立100 hPa新疆区域气温平均序列时,在11站资料的基础上增加克拉玛依站。

表1 新疆区域探空站全年无观测资料时间统计

Tab.1 No observation data time statistics in Xinjiang regional sounding station

	08:00	20:00
塔城	-	1961—1965
北塔山	-	1961—1980
伊宁	-	1961—1965
库尔勒	-	1961—1971
哈密	-	1961—1965
克拉玛依	1968—1971	1961—1973
阿克苏	1961—1985	-
民丰	1961—1998	-

注:-表示有数据。

1.1.2 高空再分析资料(NCEP/NCAR) 从NCEP/NCAR官网上(https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html)下载。运用此数据对新疆区域高空气温年际变化特征进行分析。

另外,850 hPa、700 hPa代表对流层低层;500 hPa代表对流层中层;300 hPa代表对流层上层,100 hPa代表平流层下层。常年值为1981—2010年30 a平均值。

1.2 研究方法

1.2.1 逐步回归法 逐步回归是一种线性回归模型自变量选择方法,其基本思想是将变量一个一个引入,引入的条件是其偏回归平方和检验是显著的。同时,每引入一个新变量后,对已入选回归模型的老变量逐个进行检验,将经检验认为不显著的变量删除,以保证所得自变量子集中每一个变量都是显著的,此过程经过若干步直到不能再引入新变量为止,这时回归模型中所有变量对因变量都是显著的[23]。本文运用此方法将缺测站点高空气温数据与其他探空站逐一进行相关分析,挑选最优组合站点作为回归因子,建立回归模型,对缺测数据进行插补重建。

1.2.2 交叉验证法 本文交叉验证选用MAE(平均绝对误差)和RMSE(均方根误差)两个指标[24],对冷月、暖月缺测插补重建后的数据和再分析资料(NCEP/NCAR)进行精度验证。

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{abs}(x-y) \quad (1)$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x-y)^2}{n}} \quad (2)$$

式中：x 为探空测站实测资料；y 为待检验数据；n 为用于检测的样本数目。

1.2.3 Mann-Kendall 法 Mann-Kendall 法(简称"MK")是一种非参数统计检验方法,其优点是变量不一定具有正态分布特征,少数异常值也对其不产生影响,计算过程简单,检测范围广,定量程度高[25]。本文运用此方法对高空年平均气温进行突变分析。

1.2.4 线性趋势法 利用线性趋势法,计算不同等压面气温的变化趋势,建立1961—2017年不同等压面气温 y_t 与时间 t 之间的线性回归方程:

$$y_t=at+b \quad (3)$$

式中：y_t 为气温(单位:℃)；t 为时间(单位:年)；b 为回归常数；a 为回归系数,即变化趋势,当 a 大于(小于)零时,表示存在上升(下降)趋势,$a\times10$ 为气温倾向率[单位:℃·$(10a)^{-1}$]。

2 结果分析

2.1 年平均气温变化特征分析

2.1.1 年平均气温时间变化特征 由图1可知,通过线性拟合的斜率看,对流层低、中层年均气温均呈上升趋势,增温率分别为 0.16 ℃·$(10a)^{-1}$(850 hPa)、0.15 ℃·$(10a)^{-1}$(700 hPa)、0.09 ℃·$(10a)^{-1}$(500 hPa),与地面气温变化趋势[0.31 ℃·$(10a)^{-1}$](图1f)相比,均小于地面增温率,对流层上层和平流

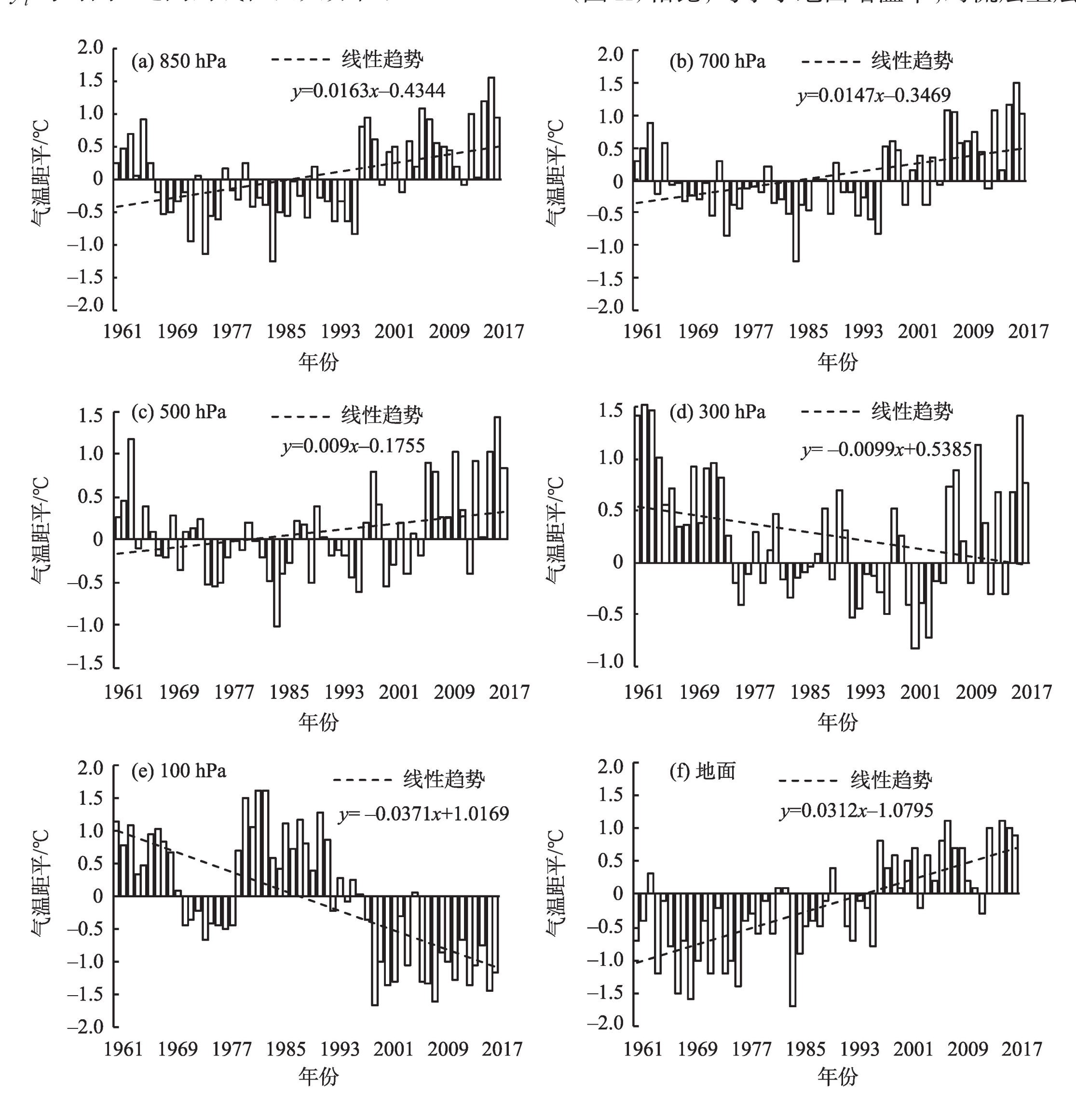


图1 1961—2017年新疆区域高空和地面年气温距平

Fig. 1 Annual upper-air and ground temperature anomaly in Xinjiang during 1961–2017

层下层年均气温均呈下降趋势，减温率分别为0.10 ℃·(10a)$^{-1}$(300 hPa)、0.37 ℃·(10a)$^{-1}$(100 hPa)。可以看出，年均温随着高度的升高气温上升的速率在减慢，下降的速率在加快，与张广兴等[14]研究结果存在一定的差异，与柏玲等[15]的结论相似，但增温率和减温率均要小于此研究结果，这主要是由于时间序列选择的长短、数据站点的选择以及数据处理方式的不同造成的差异。

通过冷暖变化特点可以得出，对流层(低、中、上)整体呈现出暖-冷-暖交替变化的特点(图1a~图1d)，平流层下层呈现暖-冷-暖-冷变化特点(图1e)。2000年后对流层各层大多为偏暖年，平流层下层为偏冷年。对流层低、中层最暖年均出现在2016年，对流层上层和平流层下层分别出现在1962年和1983年，与常年值相比偏高1.4~1.6 ℃；对流层低、中层最冷年均出现在1984年，对流层上层和平流层下层分别出现在2001年和1999年，偏低0.8~1.7 ℃。

从年代际分布看(图2)，新疆区域高空对流层低层气温呈现暖-冷-暖的变化特点，1960s、2000s和2010s偏暖，其他年代偏冷，偏暖幅度最大的年代在2010s，偏高0.6~0.8 ℃，偏冷幅度最大的年代在1970s—1980s，偏低0.3~0.4 ℃；对流层中层呈现暖-冷-暖的变化特点，1960s、1990s、2000s、2010s偏暖，1970s、1980s偏冷，偏暖幅度最大的年代在2010s，偏高0.7 ℃，偏冷幅度最大的年代在1980s，偏低0.2 ℃；对流层上层在1990s与常年持平，2000s偏冷，其余年代均偏暖，偏暖幅度最大的年代在1960s，偏高0.9 ℃；平流层下层呈现暖-冷-暖-冷的变化特点，1960s、1980s和1990s偏暖，1970s、2000s和2010s偏冷，偏暖幅度最大的年代在1980s，偏高1.1 ℃，偏冷幅度最大的年代在2010s，偏低1.1 ℃。

2.1.2 突变检验 运用MK突变检验法对1961—2017年新疆区域高空年平均气温进行突变检验，由图3a可知，850 hPa自1996年后年平均气温具有增暖趋势，*UF*和*UB*曲线在2002—2003年间相交，在2005年后增暖趋势超过显著性水平0.05临界线，表明新疆区域850 hPa年均温在此时段上升趋势十分显著；通过图4a可以看出，850 hPa气温变化趋势在1996年后开始发生转折；由图1a可以看出，1996年后气温由冷转暖，大部分年份为偏暖年份。可以得出，850 hPa气温在1996年开始转折，由冷转暖，在2002年后，尤其在2005年后增暖趋势明显。由图3b可见，700 hPa自1996年后年平均气温具有增暖趋势，*UF*和*UB*曲线在2009—2010年之间出现相交，在2014年后增暖趋势达到0.05显著性水平，表明新疆700 hPa年平均气温在2014年后上升趋势十分显著；通过图4b可以看出，700 hPa气温变化趋势在1996年后开始发生转折；通过图1b可以看出，1996年后气温由冷转暖，大部分年份为偏暖年份。可以得出，700 hPa气温与850 hPa气温转折变化一致，均发生在1996年，由冷转暖，700 hPa气温在2009年后，尤其在2014年后增暖趋势明显。由图3c可见，100 hPa自1995年后年平均气温具有减小趋势，*UF*和*UB*曲线在1998—1999年之间出现相交，在2006年后减温趋势达到0.05显著性水平，表明新疆100 hPa年平均气温在2006年后减温趋势十分显

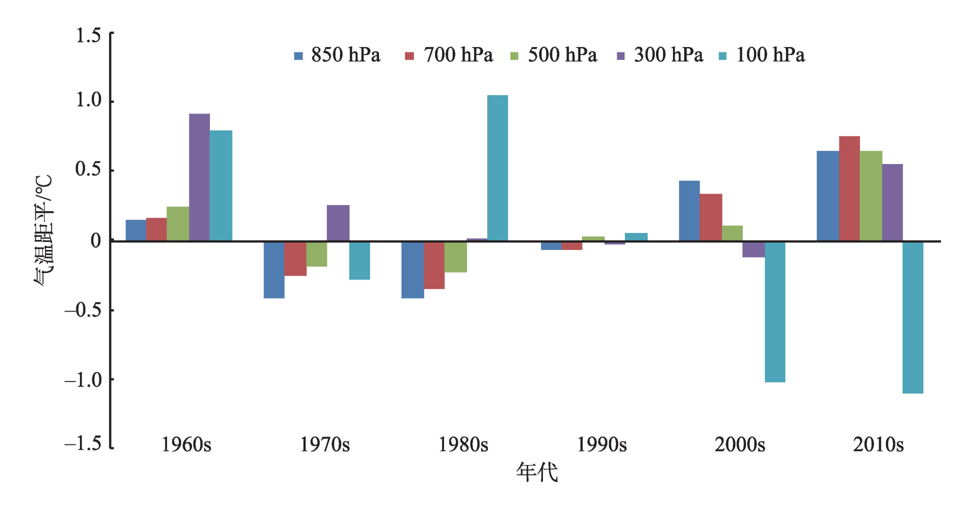
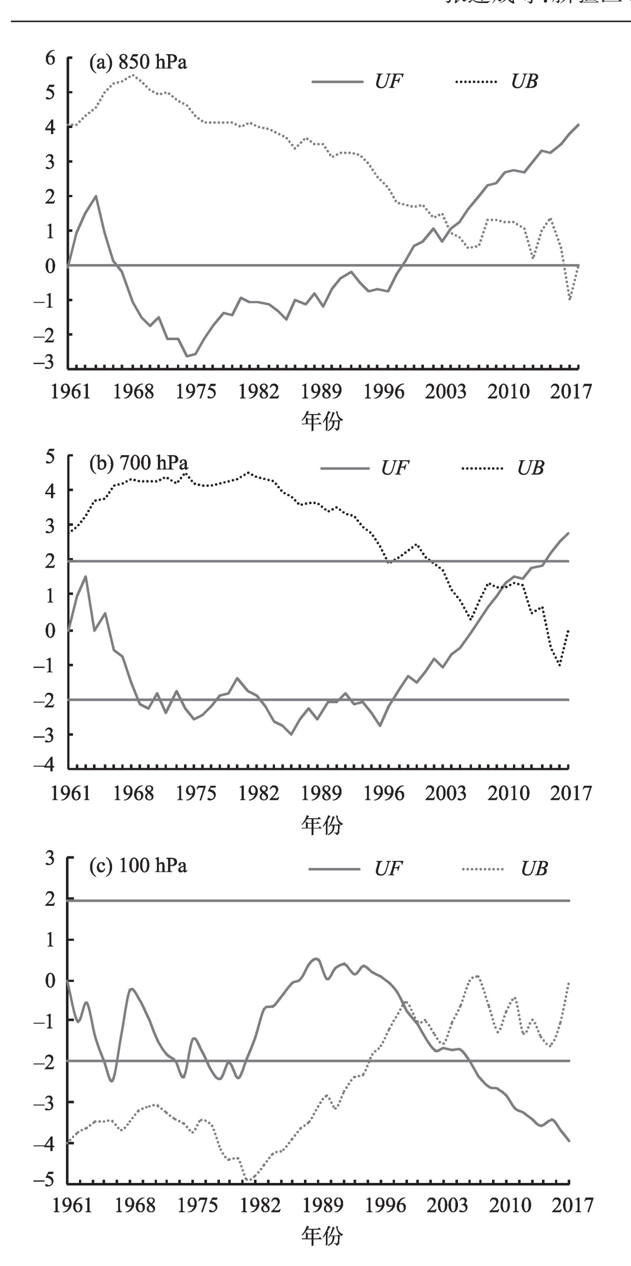


图2 1960—2010年代新疆区域高空气温距平

Fig. 2 Upper-air temperature anomaly in Xinjiang during 1960s-2010s

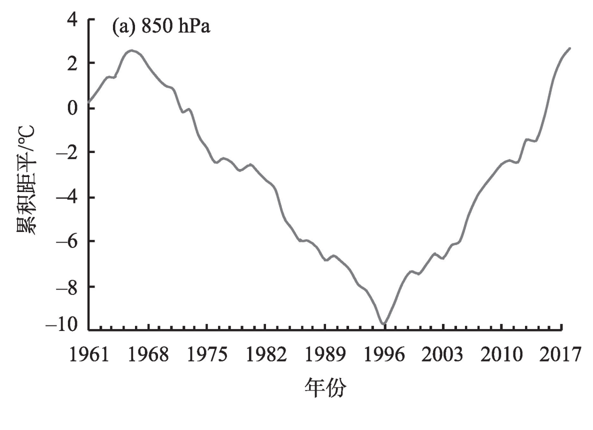


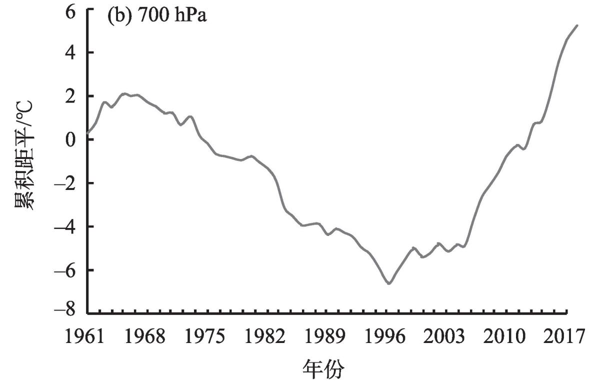
注:*UF*和*UB*取±1.96为临界曲线的MK检验值

(即0.05显著性水平的置信度检验区间)。

图3 1961—2017年新疆区域气温突变

Fig. 3 Temperature abrupt change curve in Xinjiang during 1961–2017





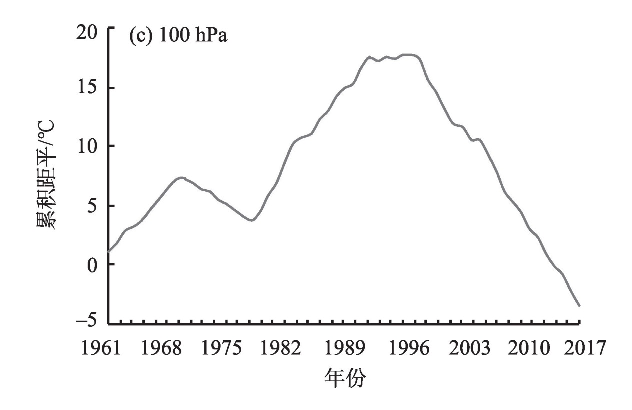


图4 1961—2017年新疆区域气温累积距平变化

Fig. 4 Temperature cumulative anomaly curve in Xinjiang during 1961–2017

著;通过图4c可以看出,100 hPa气温变化趋势在1996年后开始发生转折;通过图1e可以看出,1997年后气温由暖转冷,大部分年份为偏冷年份。可以得出,100 hPa气温转折发生在1995—1997年,由暖转冷,在1998年后,尤其在2006年后减温趋势明显。分别对500 hPa、300 hPa年平均气温进行MK检验和累计距平分析,均未出现显著突变。

2.2 冷暖月气温变化特征

探空观测数据最能代表高空气温变化的客观事实,然而新疆区域探空站观测数据缺测较多,经统计1月和7月相对较完整,缺测较少,为了更客观的反映新疆区域高空气温变化事实,通过综合考虑选取资料相对完善代表性较好的1月和7月作为冷暖月的代表月份,并对缺测的个别数据进行插补重建,在此基础上分析冷暖月不同等压面气温变化特征。

2.2.1 缺测资料的插补重建及误差检验 虽然1月和7月资料相对较好,但仍存在缺测数据,从表2中可以看出,850 hPa、700 hPa、500 hPa、300 hPa四个等压面缺测数据多分布在哈密和库车2个站点,时

间多集中在20世纪60年代和70年代，100 hPa大部分站点出现不同程度的缺测，尤其7月缺测站点较多。为了保证数据的完整性，更客观的反应新疆区域高空气温变化特征，运用逐步回归法对缺测数据进行插补重建。从表2中还可以看出，逐步回归法建立的插补回归模型的复相关系数大多在0.90以上（100 hPa 7月喀什0.82、和田0.89和1月塔城0.76除外），均通过α=0.01的显著性检验。通过交叉验证得出，缺测插补重建数据误差（MAE和RMSE）大多控制在0.5 ℃以内，最小误差仅为0.16 ℃（表2）。从以上分析可以得出，运用逐步回归法对缺测数据进行插补重建，精度较高效果较好，能够反映高空气温变化事实。

2.2.2 冷暖月年际变化特征 图5a～图5e为新疆区域1961—2017年冷月对流层（低、中、上）和平流层下层气温年际变化距平图，通过线性拟合的斜率看，对流层低层平均气温呈上升趋势，升温率0.14 ℃·(10a)$^{-1}$（850 hPa）、0.11 ℃·(10a)$^{-1}$（700 hPa）；对流层中、上层以及平流层下层均呈下降趋势，减温率分别为0.08 ℃·(10a)$^{-1}$（500 hPa）、0.20 ℃·(10a)$^{-1}$（300 hPa）、0.61 ℃·(10a)$^{-1}$（100 hPa），可以看出，1月高空气温随着高度的升高气温上升的速率在减慢，下降的速率在加快，此结论与年均气温变化趋势一致。

通过距平可以看出，对流层（低、中、上）表现为冷暖相互交替变化的特点，平流层下层表现为由暖

表2 新疆探空站1月和7月缺测数据插补重建误差统计

Tab. 2 Error statistics table of missing data interpolation reconstruction in January and July of Xinjiang sounding station

缺测年份	站点	等压面	月份	MAE	RMSE	回归模型	复相关系数
1962	库车	850 hPa	1月	0.30	0.38	0.838*库尔勒+0.225*喀什+0.813	0.97
1968	哈密			0.46	0.54	0.751*库尔勒+0.239*阿勒泰−0.424	0.96
1962	库车	700 hPa		0.26	0.30	0.73*库尔勒+0.165*喀什+0.112*伊宁市−0.007	0.99
1968	哈密			0.37	0.49	0.446*若羌+0.644*北塔山−0.097*乌鲁木齐−0.977	0.97
1962	库车	500 hPa		0.21	0.27	0.751*库尔勒+0.307*喀什+1.209	0.99
1968	哈密			0.29	0.35	0.595*北塔山+0.659*若羌−0.209和田+0.986	0.97
1968	乌鲁木齐			0.47	0.57	0.669*库尔勒+0.412*北塔山+3.946	0.91
1962	库车	300 hPa		0.31	0.41	0.773*库尔勒+0.251*喀什+1.029	0.92
1968	哈密			0.27	0.32	0.565*北塔山+0.376*若羌−3.227	0.92
1981	伊宁	100 hPa		0.21	0.25	0.438*克拉玛依+0.283*乌鲁木齐+0.179*北塔山−5.878	0.98
1996—1999	塔城			0.68	0.94	0.752*克拉玛依−14.645	0.76
2000	哈密			0.27	0.32	0.423*北塔山+0.367*若羌+0.243*喀什+2.82	0.97
1974	库车	850 hPa	7月	0.31	0.38	0.745*库尔勒+0.242*喀什+0.358	0.95
1968	哈密			0.38	0.49	0.915*库尔勒+8.735	0.91
1974	库车	700 hPa		0.19	0.25	0.569*库尔勒+0.218*喀什+0.244*伊宁市+0.461	0.97
1968	哈密			0.38	0.50	0.599*北塔山+0.426*库尔勒+1.4	0.90
1974	库车	500 hPa		0.16	0.20	0.292*库尔勒+0.406*伊宁市−0.255*阿勒泰+0.367*北塔山+0.124*喀什−0.443	0.97
1968	哈密			0.34	0.43	0.641*北塔山+0.361*若羌+0.155	0.92
1974	库车	300 hPa		0.38	0.47	0.647*库尔勒+0.383*伊宁市+1.853	0.97
1968	哈密			0.54	0.69	0.556*北塔山+0.442*若羌−0.693	0.92
1997	阿勒泰	100 hPa		0.45	0.57	0.609*北塔山+0.443*塔城+5.289	0.92
2001—2002	哈密			0.51	0.61	0.434*阿勒泰+0.75*若羌+0.179*乌鲁木齐+23.495	0.92
1981、1983	和田			0.43	0.54	0.576*若羌+0.411*喀什−3.277	0.89
1995、2000	喀什			0.61	0.81	1.032*和田−0.613*若羌+0.456*库车−6.986	0.82
1981	库车			0.36	0.49	0.909*库尔勒+0.409*伊宁−0.236*哈密+4.271	0.94
1990	库尔勒			0.29	0.37	0.192*乌鲁木齐+0.467*库车+0.366*若羌+2.339	0.97
1995	若羌			0.38	0.49	0.446*哈密+0.437*和田−9.496	0.92
1997—1998	塔城			0.39	0.49	0.601*乌鲁木齐−0.502*若羌+0.458*克拉玛依−27.517	0.93
2000	伊宁			0.37	0.50	0.675*克拉玛依+0.201*喀什−7.342	0.90

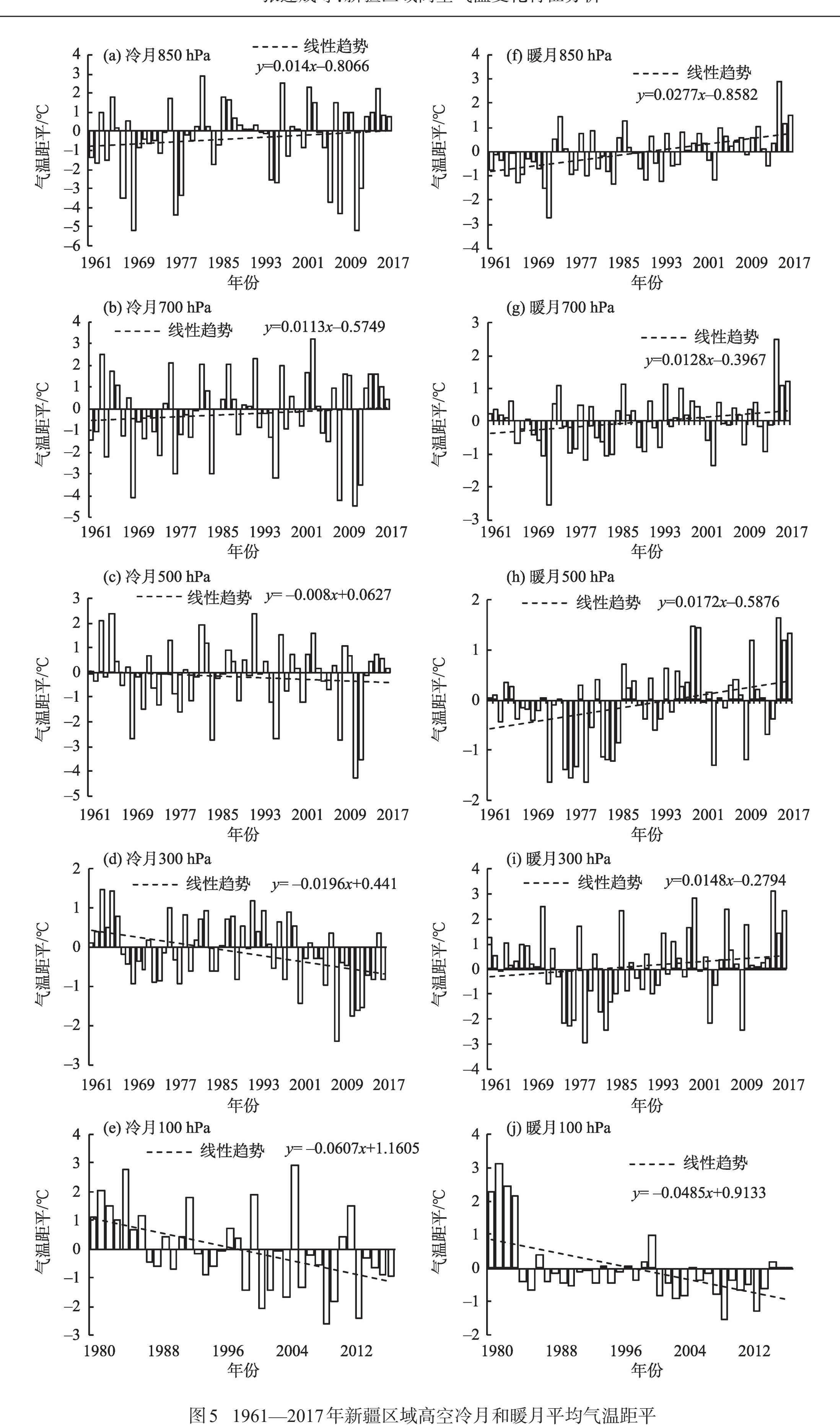


图5 1961—2017年新疆区域高空冷月和暖月平均气温距平

Fig. 5 Upper-air temperature anomaly in cold moon and warm moon in Xinjiang during 1961−2017

向冷转变的特点；2000年以后对流层低、中层，尤其是2010年以后均以偏暖为主，对流层上层和平流层下层以偏冷为主，越往上层，气温越呈偏冷趋势。最冷年多集中在2010年前后，与常年值相比偏低2.4~5.2 ℃。

图5f～图5j为新疆区域1961—2017年暖月对流层（低、中、上）和平流层下层气温年际变化距平图，通过线性拟合的斜率看，对流层低、中、上层平均气温均呈上升趋势，增温率分别为：0.28 ℃·(10a)$^{-1}$（850 hPa）、0.13 ℃·(10a)$^{-1}$（700 hPa）、0.17 ℃·(10a)$^{-1}$（500 hPa）、0.15 ℃·(10a)$^{-1}$（300 hPa），平流层下层呈下降趋势，减温率为0.49 ℃·(10a)$^{-1}$（100 hPa），总体呈现出随着高度增加增温率在下降，与1月相比随着高度的升高增温趋势向降温趋势转变要滞后，可以得出，气温越高的月份，随着高度的升高，气温趋势发生改变的高度越高。

通过距平可以看出，对流层低、中层在20世纪90年代以前以偏冷为主，90年代后以偏暖为主，对流层上层表现为暖-冷-暖交替变化的特征，平流层下层在1985年后大多为偏冷年；2000年以后对流层（低、中、上）大多为偏暖年，平流层下层为偏冷年。对流层（低、中、上）最暖年均出现在2015年，平流层下层出现在1981年，与常年值相比偏高2.4～5.2 ℃。

2.2.3 再分析资料冷暖月精度检验　新疆探空观测数据缺测较多，无法运用实测数据实现对再分析资料（NCEP/NCAR）年、季以及月时间尺度的精度检验，本文采用插补重建后的1月和7月探空观测资料对再分析资料（NCEP/NCAR）气温数据进行精度检验。运用ArcGIS 10.0空间分析工具，提取探空站点对应NCEP/NCAR格点数据，通过相关分析法得出（表3），各探空测站在不同等压面上与对应再分析资料（NCEP/NCAR）相关性均较高，均通过0.01的显著性检验。从新疆区域平均来看，1月的850 hPa、700 hPa、500 hPa、100 hPa以及7月的700 hPa、500 hPa、300 hPa、100 hPa相关系数均高于0.9，均通过0.01显著性检验，1月700 hPa、500 hPa、100 hPa以及7月300 hPa相关系数最高，均高达0.97；7月850 hPa为0.80，通过0.01显著性检验；1月300 hPa相关系数相对较低，为0.54，但也通过0.01显著性检验。

运用交叉验证法得出（表4），高空再分析气温资料误差大多控制在1.0 ℃以内（1月300 hPa除外）。其中，1月100 hPa、7月500 hPa和300 hPa误差均控制在0.5 ℃以内；7月500 hPa误差最小，MAE为0.29 ℃、RMSE为0.39 ℃，1月300 hPa误差最大，MAE为1.17 ℃、RMSE为1.47 ℃。

新疆探空站对应的再分析资料（NCEP/NCAR）1月和7月气温数据与实测数据相关系数大多在0.9以上，偏差较小。针对目前新疆区域高空缺测数据较多的情况下，高空再分析气温数据可以替代新疆区域高空气温探空测站资料，对新疆区域高空气温变化进行客观分析。但在个别等压面上存在相关性相对较弱，如1月300 hPa各站普遍相关程度偏弱，7月850 hPa、700 hPa喀什、和田等站的相对程度也偏弱。这些差异是否与新疆特殊的地理环境、地形条件等有关联，有待进一步研究探讨。

表3　高空再分析资料相关性检验

Tab. 3　Correlation test of the NCEP/NCAR reanalysis data

等压面	月份	阿勒泰	塔城	北塔山	伊宁市	乌鲁木齐	库车	库尔勒	喀什	若羌	和田	哈密	克拉玛依	全疆
850 hPa		0.44	0.96	–	0.93	0.93	0.80	0.80	0.64	0.73	0.59	0.86	–	0.90
700 hPa		0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.95	0.96	0.86	0.98	0.69	0.97	–	0.97
500 hPa	1月	0.98	0.98	0.97	0.96	0.94	0.96	0.97	0.92	0.92	0.86	0.97	–	0.97
300 hPa		0.37	0.39	0.46	0.47	0.52	0.54	0.52	0.36	0.50	0.30	0.54	–	0.54
100 hPa		0.97	0.74	0.91	0.93	0.96	0.94	0.94	0.95	0.93	0.93	0.96	0.95	0.97
850 hPa		0.90	0.86	–	0.71	0.86	0.60	0.61	0.35	0.44	0.50	0.80	–	0.80
700 hPa		0.90	0.94	0.88	0.94	0.84	0.87	0.89	0.67	0.78	0.56	0.91	–	0.90
500 hPa	7月	0.88	0.91	0.90	0.86	0.85	0.88	0.93	0.91	0.94	0.87	0.90	–	0.93
300 hPa		0.89	0.93	0.93	0.94	0.90	0.97	0.95	0.96	0.95	0.87	0.93	–	0.97
100 hPa		0.97	0.90	0.93	0.85	0.94	0.86	0.91	0.90	0.93	0.85	0.98	0.91	0.96

注：–表示未参与检验。

表4 高空再分析资料的误差统计

Tab. 4 Error statistics table of the NCEP/NCAR reanalysis data

等压面	月份	MAE	RMSE
850 hPa	1月	0.85	1.0
700 hPa		0.98	1.0
500 hPa		0.53	0.63
300 hPa		1.17	1.47
100 hPa		0.33	0.39
850 hPa	7月	0.85	0.91
700 hPa		0.58	0.68
500 hPa		0.29	0.39
300 hPa		0.34	0.46
100 hPa		0.57	0.67

3 结 论

运用再分析资料(NCEP/NCAR),分析新疆区域高空年平均气温变化特征,同时运用逐步回归法对新疆高空冷月、暖月气温数据进行缺测插补,并且通过交叉验证法对插补重建数据进行精度检验,在此基础上分析新疆区域冷月、暖月高空气温变化特征,同时运用插补重建后的数据对再分析资料(NCEP/NCAR)进行精度检验,得出如下结论:

(1) 通过对新疆区域对流层(低、中、上)、平流层下层的冷暖月、年均温变化趋势分析得出,随着高度的上升新疆高空气温变化趋势由升温转为降温,并且随着高度的上升升温率在减小,减温率在增大;气温越高的月份,随着高度的升高,气温变化趋势发生改变的高度就越高;2000年后,对流层各层多为偏暖年,平流层下层多为偏冷年。

(2) 新疆高空850 hPa和700 hPa年均温在1996年开始转折,由冷转暖,100 hPa发生在1995—1997年,由暖转冷,500 hPa和300 hPa均未出现明显的突变年份。

(3) 再分析资料(NCEP/NCAR)1月、7月气温与实测数据相关系数大多在0.9以上,总体误差相对较小,可以反映新疆区域高空气温变化的客观事实。

参考文献(References):

[1] 谢潇. 全球变暖背景下多种资料的高空温度特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012. [Xie Xiao. Features of Upper-Level Air Temperature from Different Kinds of Datasets on the Background of Global Warming[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.]

[2] 翟盘茂, 郭艳君. 高空大气温度变化研究[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(5): 228−232. [Zhai Panmao, Guo Yanjun. A sutdy of upper aire tmperautre change[J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(5): 228−232.]

[3] 薛德强, 谈哲敏, 龚佃利, 等. 近40年中国高空温度变化的初步分析[J]. 高原气象, 2007, 26 (1): 141−149. [Xue Deqiang, Tan Zhemin, Gong Tianli, et al. Primary analyses of upper-air temperature changes in china in past 40 years[J]. Plateau Meteorological, 2007, 26(1): 141−149.]

[4] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2 (1): 3−8. [Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. National assessment reportof climate change Ⅰ: Climate change in China and its future trend[J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 2 (1): 3−8.]

[5] 张金峰. 哈尔滨市高空气候要素变化规律分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2010. [Zhang Jinfeng. Study on High Altitude Variation of Climate Elements in Harbin[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2010.]

[6] 谢潇, 祁莉, 何金海. 1980—2009年中国东部上空温度变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 102−109. [Xie Xiao, Qi Li, He Jinhai. An analysis on upper-air temperature over eastern china during 1980−2009[J]. Advances in Climate Change Research, 2019, 9(2): 102−109.]

[7] 郭艳君, 李庆祥, 丁一汇. 探空资料中的人为误差对中国温度长期变化趋势的影响[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1309−1318. [Guo Yanjun, Li Qingxiang, Ding Yihui. The effect of artificial bias on free air temperature trend derived from historical radiosonde data in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(6): 1309−1318.]

[8] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63−73. [Qin Dahe, Chen Zhenlin, Luo Yong, et al. Updated understanding of climate change sciences[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(2): 63−73.]

[9] Free M, Seidel D J. Causes of differing temperature trends in radiosonde upper air data sets[J]. Journal Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(D7): 7101−7115.

[10] Oort A H, Liu H. Upper-air temperature trends over the globe, 1958−1989[J]. Journal of Climate, 1993, 6(2): 292−307.

[11] 陈芳, 马英芳, 金慧瑛. 高空温度、高度变化特征及其与地面气温的相关分析[J]. 气象科技, 2005, 33(2): 163−167. [Chen Fang, Ma Yingfang, Jin Huiying. Upper-level height and temperature change characteristics and its correlation with surface temperature [J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(2): 163−167.]

[12] 姜逢清, 胡汝骥. 近50年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 35−40. [Jiang Fengqing, Hu Ruji. Climate change and flood & drought disasters in Xinjiang during recent 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(1): 35− 40.]

[13] 江远安, 尹宜舟, 陈鹏翔, 等. 1961—2014年新疆降水极值概率特征及拟合不确定性分析[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(1): 52-60. [Jiang Yuanan, Yin Yizhou, Chen Pengxiang, et al. Study on probabilistic characteristic and uncertainty in fitting of precipitation extremes over Xinjiang during 1961-2014[J]. Climate Change Research, 2017, 13(1): 52-60.]

[14] 张广兴, 赵玲, 孙淑芳. 新疆1961—2000年高空温度变化若干事实及突变分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 908-917. [Zhang Guangxing, Zhao Ling, Sun Shufang. Analysis of some facts and abrupt change of upper air temperature in Xinjiang during 1961-2000[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(5): 908-917.]

[15] 柏玲, 陈忠升, 王祖静, 等. 1980—2013 年新疆高空大气温度变化特征[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 458-465. [Bai Ling, Chen Zhongsheng, Wang Zujing, et al. Upper-air temperature change of Xinjiang during 1980-2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(3): 458-465.]

[16] 侯玲红, 杨霞, 邢芝芳, 等. 喀什1971—2010年高空温度气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(6): 42-45. [Hou Linghong, Yang Xia, Xing Zhifang, et al. Climate characteristics of the upper-air temperature in Kashi from 1971 to 2010[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2011, 5(6): 42-45.]

[17] Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 2004, 427(6970): 145-148.

[18] 张扬, 楚新正, 杨少敏, 等. 近56 a新疆北部地区气候变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 212-219. [Zhang Yang, Chu Xinzheng, Yang Shaomin, et al. Climate change in North Xinjiang in recent 56 years[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 212-219.]

[19] 刘伟, 姜逢清, 李小兰. 新疆气候变化的适应能力时空演化特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 531-540. [Liu Wei, Jiang Fengqing, Li Xiaolan. Spatiotemporal evolution of adaptive capacity to climate change in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 531-540.]

[20] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 新疆气候变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 499-508. [He Jinyun, Zhang Mingjun, Wang Peng, et al. New progress of the study on climate change in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 499-508.]

[21] 支星, 徐海明. 3种再分析资料的高空温度与中国探空温度资料的对比: 年平均特征[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 77-87. [Zhi Xing, Xu Haiming. Comparative analysis of free atmospheric temperature between three reanalysis datasets and radiosonde dataset in China: Annual mean characteristic[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(1) : 77-87.]

[22] 周顺武, 张人禾. 青藏高原地区上空NCEP/NCAR再分析温度和位势高度资料与观测资料的比较分析[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(3): 284-292. [Zhou Shunwu, Zhang Renhe. Comparison of NCEP/ NCAR reanalysis data and radiosonde data about temperature and geopot ential height of upper air over the Tibet an Plateau[J]. Climatic and Environmental Research, 2009, 14(3): 284-292.]

[23] 游士兵, 严研. 逐步回归分析法及其应用[J]. 统计与决策, 2017, 14(5): 21-35. [You Shibing, Yan Yan. Stepwise regression analysis and its application[J]. Decision and statistics, 2017, 14(5): 21-35.]

[24] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地地区气象要素的空间插值[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 47-56. [Lin Zhonghui, Mo Xingguo, Li Hongxuan, et al. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(1): 47-56.]

[25] 杨义, 舒和平, 马金珠, 等. 基于Mann-Kendall法和小波分析中小尺度多年气候变化特征研究——以甘肃省白银市近50年气候变化为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 126-131. [Yang Yi, Shu Heping, Ma Jinzhu, et al. Small and medium scale of climatic variation characteristics of Baiyin city, Gansu Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5): 126-131.]

Analysis of the upper-air temperature change in Xinjiang region

ZHANG Liancheng[1], ZHANG Taixi[1], MAO Weiyi[2], SI Jiayi[3],
ZHANG Tongwen[2], WANG Shengli[1]
(1. Xinjiang Uygur Autonomous Region Climate Center, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Urumqi Desert Institute of CMA, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
3. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, Xinjiang, China)

Abstract: Here, we analyzed the mean annual variations in upper-air temperature features in the Xinjiang region with the NCEP/NCAR reanalysis dataset. We used stepwise regression to interpolate the missing values in the measured data and verified them using a cross-validation method. We analyzed the change in upper-air temperature both in the coldest (January) and the warmest (July) months. Additionally, we verified the NCEP/NCAR data's accuracy in both January and July with the upper-air measured data. The results indicated that the measured data can describe the upper-air temperature in Xinjiang more accurately after interpolation. We examined the average temperature trends in the troposphere (at the bottom, middle, and upper layers) and the lower stratosphere on both the coldest and warmest months and throughout the year. As the height rises, the temperature trend changes from warming to cooling temperatures. The critical height at which the temperature trend reverses is higher during the warmer months. In most years after 2000, the air temperature exhibited a warm anomaly in the troposphere a cold anomaly in the lower stratosphere. The turning point in the annual mean temperature anomaly, which turned from cold to warm, occurred in 1996 at both 850 hPa and 700 hPa levels. However, between 1995 and 1997, it happened at the 100 hPa level, showing a warm to cold trend. The temperature anomaly did not change abruptly between 500 hPa and 300 hPa. The NCEP/NCAR data and measured data in January and July had a correlation coefficient mostly above 0.9, indicating a relatively small error.

Keywords: upper-air temperature; climate change; Xinjiang region